

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

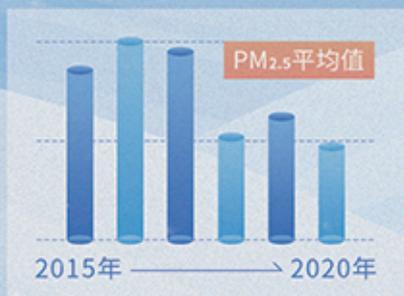
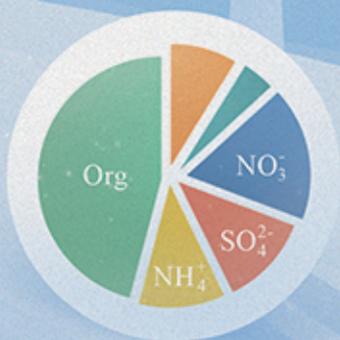
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裘彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM_{2.5} 污染特征分析..... 刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏(3895)

天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析 郝困, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青(3903)

长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响 王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲(3913)

滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价 范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海(3923)

典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性..... 秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓雨, 徐勃, 耿春梅(3934)

大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源 朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉(3944)

河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径..... 刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克(3953)

京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍(3966)

2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征 王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙(3977)

钢铁生产行业二氧化硫污染特征变化及其排放因子 杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔(3990)

长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价 胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静(3998)

基于蒙特卡洛模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析..... 鹿阔, 李敏, 刘璐, 杨璐璐, 赵洪军(4008)

梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例 王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武(4018)

基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算 王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生(4032)

河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响 李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波(4042)

联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源 张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿(4054)

江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价 李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯(4064)

天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策 吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰(4074)

宁夏第三排水沟中药物和个人护理品(PPCPs)的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦(4087)

再生水河道浮游微生物多样性季节变化分析: 以北运河为例 袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽(4097)

太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析 杜瑛琦, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙(4108)

太湖氧化亚氮(N₂O)排放特征及潜在驱动因素 刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强(4118)

海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价 雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博(4127)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜(4136)

环境 pH 条件下 Fe²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素 刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎(4146)

新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价 谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫(4154)

宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞(4166)

宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素 王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红(4179)

地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法 王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(4190)

姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评估 于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳(4199)

基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测 杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥(4212)

柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险 朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波(4219)

不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性 任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞瑛, 赵海洋(4232)

橡胶草(TKS)对铅镉污染农田土壤的修复潜力 张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥(4253)

3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力 张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚(4262)

连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响 彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉(4271)

改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响 杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良(4282)

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响 张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春(4292)

水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强(4301)

外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响 郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉(4313)

不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响 冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌(4322)

基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响 鹿发虎, 李晓琦, 段荆阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进(4333)

汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子 陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓(4342)

岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较 冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松(4353)

戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素 吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚(4364)

长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响 刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹(4372)

秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N₂O 排放的影响 白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠(4379)

聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响 邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙(4387)

微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响 王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平(4394)

氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比 陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩(4402)

《环境科学》征订启事(4211) 《环境科学》征稿简则(4312) 信息(3922, 4031, 4107)

玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果

胡曼利¹, 郝庆菊^{1,2}, 马容真¹, 陈柯沁¹, 罗师旭¹, 江长胜^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 人工湿地在处理低 C/N 污水时存在碳源缺乏而严重限制反硝化进行的问题。为了补充反硝化需要的碳源, 选择了玉米芯和稻草秸秆作为外加碳源引入湿地系统, 对比两种碳源对湿地脱氮的强化效果。结果表明, 通过 11 d 的纯水浸提释放实验发现, 碳素累积释放量: 稻草秸秆 $[(145.17 \pm 9.44) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}] >$ 玉米芯 $[(57.41 \pm 5.04) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$; 氮素累积释放量: 稻草秸秆 $[(2.31 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}] >$ 玉米芯 $[(0.66 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$ 。在观测的时间内, 玉米芯和稻草秸秆累积释放碳氮比平均值分别为 94.78 和 63.64。相比于稻草秸秆, 玉米芯更适合作为外加碳源。在为期 58 d 的潜流人工湿地实验中, 发现除了第 8 ~ 12 d, 添加玉米芯和稻草秸秆人工湿地出水中 $\rho(\text{COD})$ 超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 外, 其它时间都低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在观测期间, 添加玉米芯人工湿地的 NO_3^- -N 去除率为 93% ~ 99%, 具有良好的反硝化性能。而添加稻草秸秆人工湿地在运行后期 NO_3^- -N 去除率最低只有 76.8%, 反硝化速率明显下降。对照组 NO_3^- -N 去除率只有 76.2% ~ 77.7%, 出现了明显碳源不足的现象。碳源不足还造成了 NO_2^- -N 的蓄积。添加稻草秸秆和对照组人工湿地中 NO_2^- -N 的出水质量浓度分别是玉米芯人工湿地的 2.5 ~ 6 倍和 6 ~ 26 倍。与添加稻草秸秆比, 添加玉米芯可以使人工湿地中 NO_2^- -N 出水质量浓度得到更显著地降低 ($P < 0.05$)。玉米芯、稻草秸秆和对照组人工湿地 TN 去除率分别为 83.75% ~ 93.49%、76.59% ~ 78.85% 和 67.85% ~ 72.56%, 三者之间存在显著性差异 ($P < 0.01$)。最后, 通过对玉米芯进行了稀碱加热预处理, 使玉米芯的碳素累积释放量提高到 $(93.73 \pm 17.49) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 累积释放的碳氮比提高至 175.8, 进一步提高了玉米芯的释碳性能, 表现为更合适的外加碳源。

关键词: 潜流人工湿地; 低碳氮比; 脱氮; 玉米芯; 稻草秸秆

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4136-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112237

Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater

HU Man-li¹, HAO Qing-ju^{1,2}, MA Rong-zhen¹, CHEN Ke-qin¹, LUO Shi-xu¹, JIANG Chang-sheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: The lack of carbon sources severely inhibits denitrification in wastewater with a low C/N ratio. Corncob and rice straw were chosen as supplementary carbon sources to bring into the wetland system to supplement the carbon sources needed for denitrification, and the enhancing effects of the two carbon sources on nitrogen removal from the wetland were studied. The cumulative release of carbon was in the order of rice straw $[(145.17 \pm 9.44) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}] >$ corncob $[(57.41 \pm 5.04) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$ based on the 11-day pure water extraction and release experiment, whereas the cumulative release of nitrogen was in the order of rice straw $[(2.31 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}] >$ corncob $[(0.66 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$. The average carbon/nitrogen ratios released and accumulated by corncob and rice straw during the observation period were 94.78 and 63.64, respectively. Corncob was more suited as an additional carbon source than rice straw. COD concentrations in the effluent from the corncob and straw constructed wetlands were found to be below $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for the 58-day pilot test of subsurface flow constructed wetlands, except on days 8 to 12. The NO_3^- -N removal rates of the corncob-added built wetlands were 93%~99% over the observation period, with good denitrification performance. In comparison, the lowest NO_3^- -N removal rate of the constructed wetland with the addition of rice straw was only 76.8% at the late stage of operation, and the denitrification rate dropped dramatically. The control group removal rates of NO_3^- -N were only 76.2%~77.7%, indicating a clear lack of carbon sources. The accumulation of NO_2^- -N was also induced by a lack of carbon supply. NO_2^- -N effluent concentrations were 2.5-6 times and 6-26 times higher in the constructed wetlands with rice straw and the control groups, respectively, than those in the wetlands constructed with corncob. The addition of corncob resulted in a more substantial reduction in NO_2^- -N content in the constructed wetland than the addition of rice straw ($P < 0.05$). The TN removal rates of wetlands constructed with corncob and rice straw and the control group were 83.75%~93.49%, 76.59%~78.85%, and 67.85%~72.56%, respectively, with significant differences among the three ($P < 0.01$). Finally, pretreatment with dilute alkali heating raised the cumulative carbon release of corncob to $(93.73 \pm 17.49) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and the carbon/nitrogen ratio to 175.8, significantly improving the carbon release performance of corncob and demonstrating that it is a suitable source of extra carbon.

Key words: subsurface flow constructed wetland; low carbon/nitrogen ratio; denitrification; corncob; straw

人工湿地是一种可持续性的污水处理方式, 具有应用范围广、成本低且处理有效的优点^[1]。其脱氮过程是物理、化学和生物反应协同作用的结果, 如植物吸收、基质吸附和微生物作用等^[2]。但一般认为, 微生物的硝化反硝化过程才是人工湿地中氮

收稿日期: 2021-12-23; 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977186); 重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0476, cstc2019jcyj-msxmX0425)

作者简介: 胡曼利(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为人工湿地污水处理, E-mail: 1104963891@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangsc@126.com

去除的主要途径^[3~5]. Spielles 等^[6]的研究发现,通过微生物的反硝化过程去除的氮量可以达到氮去除总量的 60%~70%,而 Vymazal^[7]的研究指出,湿地植物即使在极佳条件下因生物量增加而去除的氮量也只占氮去除总量的 10%~16%. 反硝化作用是利用微生物在缺氧条件下的呼吸作用,将硝酸盐以 N_2 和 N_2O 的形式排放至大气中,实现去除硝酸盐的主要过程^[8]. 在这个过程中,有机或者无机碳源是电子供体和能源,氮氧化物均是呼吸作用电子传递的末端电子受体^[7]. 影响反硝化作用的因素众多,如溶解氧、碳源、pH 和温度等,其中碳源的缺乏是限制反硝化进行的关键因素. 碳源一方面可以通过微生物消耗有机物降低系统中溶解氧水平,另一方面可以为反硝化过程提供电子供体,共同为反硝化作用创造反应条件,从而促进人工湿地中脱氮反应的进行. 因此,对于 C/N 较低的水,如农业径流和经处理的城市污水,需要补充碳源进行反硝化,保证人工湿地的脱氮效果.

甲醇、葡萄糖和乙酸钠等都可作为外加碳源添加至人工湿地中,旨在提高对低 C/N 废水的脱氮作用^[9~12]. 虽然这些有机碳源可以显著提高人工湿地的脱氮性能,但也存在着碳源的突然大量释放造成的二次污染及成本高昂的缺点^[13~15]. 农业固体废弃物具有分布广泛、成本低廉,而且还具有释碳缓慢、使用寿命长的优势,是外加碳源的不错选择. 邵留等^[16]对比了玉米芯、稻壳、稻草和木屑这 4 种农业废弃物的释碳规律及环境因子对其释碳能力的影响,认为稻草和玉米芯均较适合作为反硝化碳源. Jia 等^[17]在人工湿地中加入各种农业生物质,在进水 C/N = 0.5 时,发现添加小麦秸秆和核桃壳人工湿地的 TN 去除率均能达到 96% 以上. Li 等^[18]添加玉米芯和玉米芯浸出液作为人工湿地补充碳源,发现 NO_3^- -N 去除率分别达到 $(94.9 \pm 6.0)\%$ 和 $(87.1 \pm 13.2)\%$.

往人工湿地中添加植物碳源的确能提高 TN, 尤其是 NO_3^- -N 的去除率,但同时也存在植物碳源造成的二次污染问题,如出水 ρ (COD) 超过排放限值. 在本课题组,赵仲婧等^[19,20]的研究发现,人工湿地填充铁碳+沸石、铁碳+砾石和砾石等填料,能明显提高污水的处理效果并减排温室气体,但其对进水 C/N 均控制在 5. 对于低 C/N 污水,如何提高其污水处理效果? 因此,在以上研究的基础上,本文选择添加玉米芯和稻草秸秆两种植物碳源,探究不同植物碳源添加对潜流人工湿地处理低 C/N 污水处理效果的影响,以期提高污水处理效率.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验使用的所有玉米芯和稻草秸秆均一次性采购于重庆市北碚区某农户. 将玉米芯切成体积为 $1 \sim 2 \text{ cm}^3$ 的小块,将稻草秸秆剪成 $2 \sim 3 \text{ cm}$ 长. 两种供试材料统一用蒸馏水清洗 3 遍,置于 50°C 下烘 24 h,烘干至恒重后装入密封袋置于干燥器中备用.

取上述处理过的玉米芯进行稀碱加热预处理: 在烧杯中依次加入上述处理好的备用玉米芯和 2.0% NaOH 溶液,调节固液比(按质量计)至 1:30,再将烧杯放于恒温水浴锅中 90°C 浸煮 1 h,过滤出玉米芯,用纯水冲洗 3 次后,放于 50°C 烘箱中烘干至恒重后取出,放于干燥器中保存. 本步骤预处理后得到的玉米芯,以下称为玉米芯(预).

1.2 玉米芯和稻草秸秆的纯水浸提释放实验

称取备用的玉米芯、稻草秸秆和玉米芯(预)各 2.00 g,为防止碳源漂浮加入适量洁净的玻璃珠,一起装入 60 目的尼龙网袋,制成植物碳源包. 将碳源包置于 250 mL 烧杯内,加入 200 mL 蒸馏水浸泡,为防止进入杂物,用保鲜膜封住瓶口,每种碳源设置 3 组平行. 设计实验周期为 11 d. 每天对浸提液进行取样,测定其 COD 和 TN 质量浓度,并利用公式(1)计算碳素和氮素累积释放量,以 COD 和 TN 累积释放量表征碳素和氮素的累积释放量. 取样后立即重新加入 200 mL 蒸馏水并还原装置.

$$m_n = m_{n-1} + 0.5C_n \cdot V \quad (1)$$

式中, m_n 为第 n 次取样时 1 g 植物碳源累积释放以 COD 表征的碳源量(mg); m_{n-1} 为第 $n-1$ 次取样时 1 g 植物碳源累积释放以 COD 表征的碳源量(mg); C_n 为在第 n 次时浸提液 COD 的质量浓度 $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$; V 为第 n 次时距第 $n-1$ 次时浸提液的体积(L),本实验中 $V=0.2 \text{ L}$.

1.3 构建潜流人工湿地装置中试

本实验在西南大学农场的温室大棚内进行. 潜流人工湿地装置的如文献[19]所述,不同之处在于本实验所用人工湿地装置中设置了 4 根 PVC 管(如图 1),其中中央一根用于填料采样,周围 3 根分别用于进出水以及添加碳源.

本实验构建了 1~9 组共 9 组人工湿地装置,装置概况如表 1,其中 3、6 和 9 组装置为空白对照组. 1~3、4~6 和 7~9 组人工湿地分别简称为铁-沸、铁-砾和砾石人工湿地. 用 60 目的尼龙网包覆住植物碳源和砾石,做成植物碳源包,并系上绳子,投加到碳源添加管中等高度(40%~60%)的位置^[21]. 为避免植物碳源在湿地运行前期释放大量有机物导致

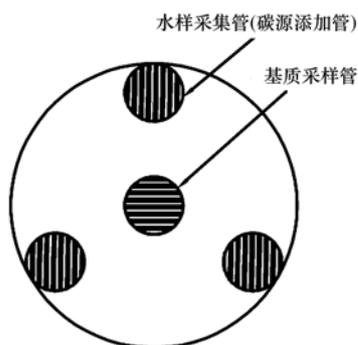


图1 潜流人工湿地装置俯视图

Fig. 1 Top view of used subsurface flow constructed wetland device

出水 COD 质量浓度过高,在投加碳源时将系统初始 C/N 值统一设为 6. 装置进水采用统一配水,进水初始 COD/TN = 3. 根据公式 $(\text{COD}_{\text{进水}} + \text{COD}_{\text{碳源}}) / (\text{TN}_{\text{进水}} + \text{TN}_{\text{碳源}}) = 6$ 、碳/氮素累积释放量和装置体积等确定碳源人工湿地添加的具体外加碳源量.

选种的湿地植物为菖蒲 (*Acorus calamus* L.), 取自重庆市北碚区某河流沿岸. 人工湿地装置于 2021 年 5 月 12 日构建并试运行; 5 月 20 日引入驯化 3 周的活性污泥; 5 月 26 日开始加入各植物碳源, 并定为系统正式运行第 0 d. 为观察玉米芯和稻草秸秆对人工湿地长期运行的影响, 潜流人工湿地在运行第 58 d 时取出碳源, 结束中试.

表 1 构建的潜流人工湿地装置基本情况¹⁾

Table 1 Setting of subsurface flow constructed wetlands

装置编号	填料组成	外加碳源种类
1	40% 铁碳 + 60% 沸石	玉米芯
2	40% 铁碳 + 60% 沸石	稻草秸秆
3	40% 铁碳 + 60% 沸石	/
4	40% 铁碳 + 60% 砾石	玉米芯
5	40% 铁碳 + 60% 砾石	稻草秸秆
6	40% 铁碳 + 60% 砾石	/
7	砾石	玉米芯
8	砾石	稻草秸秆
9	砾石	/

1) “/”表示未添加碳源

设置的水力停留时间为 2 d. 进水采用实验室配置的模拟污水, COD/TN 约为 3. 进水中 COD、氨氮和硝态氮分别由蔗糖、氯化铵和硝酸钾提供, 每 L 进水中含有 (153.75 ± 7.66) mg COD、 (19.51 ± 1.09) mg NH_4^+ -N 和 (28.87 ± 2.09) mg NO_3^- -N. 进水其它组分质量浓度同文献[19]. 实验以间歇曝气方式运行, 曝气时间设置参考 Zhou 等^[22] 的实验结论, 即每天曝气 2 h, 具体时间为 11:00 ~ 12:00 和 22:00 ~ 23:00, 最高 DO 控制在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

1.4 水样采集及分析方法

水样采集时间固定在采样当天 09:00 ~ 10:00. COD 采用重铬酸盐法^[23] 测定, TN、 NO_3^- -N 和

NO_2^- -N 测定方法分别为碱性过硫酸钾紫外分光光度法^[24]、紫外分光光度法^[25] 和 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法^[26].

2 结果与分析

2.1 玉米芯和稻草秸秆的碳、氮释放特征

2.1.1 碳素累积释放量(以 COD 计)

为了考察玉米芯、稻草秸秆和玉米芯(预)的释碳量和释碳速率, 分别测定了在不同时间内 3 种碳源浸提液中的 COD 质量浓度, 并根据公式(1) 计算出了释碳总量, 结果如图 2 所示. 从中可以看出, 玉米芯和稻草秸秆在前 2 d 内 COD 释放速率均较快, 第 3 d 后其释放速率就基本达到稳定, 其累积释放量也未见明显增长; 而预处理后的玉米芯在前 2 d 的 COD 释放速率低于普通玉米芯和稻草秸秆, 但是第 3 ~ 11 d 其 COD 释放速率显著高于其它两组碳源 ($P < 0.01$), 随着时间的增长, 预处理后玉米芯的 COD 释放速率不断加快并在第 9 d 达到最大值, 之后日渐降低. 最终, 稻草秸秆碳素累积释放量为 $(145.17 \pm 9.44) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于普通玉米芯 $[(57.41 \pm 5.04) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$ 和预处理后的玉米芯 $[(93.73 \pm 17.49) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$ ($P < 0.01$), 普通玉米芯要低于预处理后的玉米芯, 4 d 后两者的碳素累积释放量出现显著性差异 ($P < 0.01$).

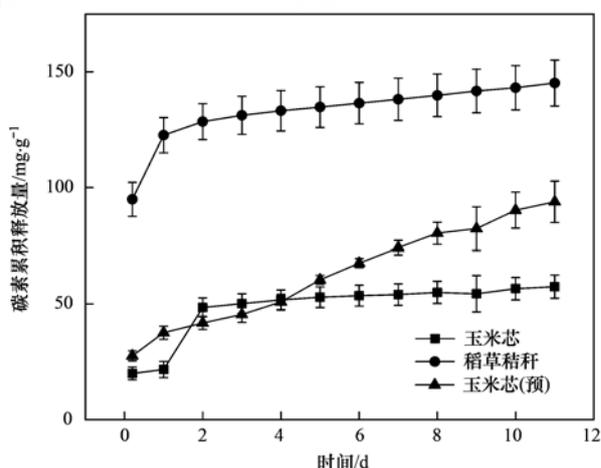


图2 普通玉米芯、稻草秸秆和预处理后玉米芯的浸提液中碳素累积释放量

Fig. 2 Cumulative carbon release from the extract of common corncob, rice straw, and pretreated corncob

2.1.2 氮素累积释放量(以 TN 计)

由于纤维素固体碳源含有类蛋白质等含氮化合物, 在碳素释放的同时也会一同释放, 可能会引起水质的恶化, 因此有必要对浸提液中的氮素质量浓度进行测定. 由图 3 可知, 两种玉米芯的氮素释放规律基本相同, 释放量较低且释放较稳定. 在氮素累积释

放量方面, 稻草秸秆 11 d 内累积释放的氮素为 $(2.31 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于普通玉米芯 $[(0.66 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$ 和稀碱加热预处理的玉米芯 $[(0.51 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}]$ ($P < 0.01$), 普通玉米芯的释氮量是稀碱加热预处理后玉米芯释放的 1.29 倍, 但是两者之间没有显著性差异. TN 释放速率大小为: 稻草秸秆 > 普通玉米芯 > 玉米芯(预).

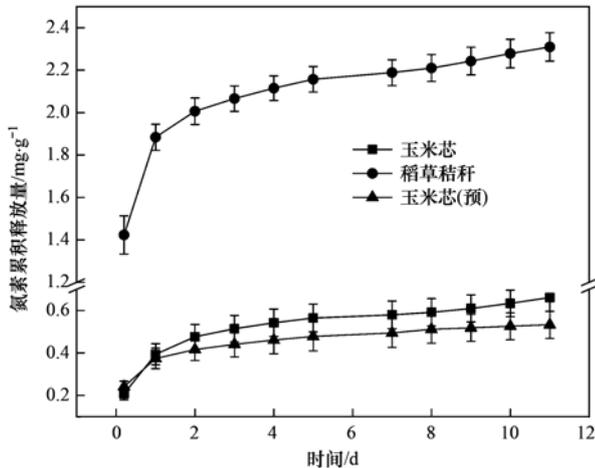


图3 普通玉米芯、稻草秸秆和预处理后玉米芯浸提液中的氮素累积释放量

Fig. 3 Cumulative nitrogen release from the extract of common corncob, rice straw, and pretreated corncob

2.1.3 植物碳源累积释放的碳素量/氮素量分析

玉米芯、稻草秸秆和玉米芯(预)累积释放的碳素量/氮素量(累积释放碳氮比)结果如图4所示. 从大到小依次为: 玉米芯(预) > 玉米芯 > 稻草秸秆 ($P < 0.01$), 其对应的累积释放碳氮比平均值分别为 133.8、94.8 和 63.6. 普通玉米芯和稻草秸秆累积释放碳氮比均在 1 d 内达到最大值(105.5 和

66.7) 并缓慢下降; 而预处理后的玉米芯在前期有一个短暂下降阶段(0~1 d), 之后一直稳定上升, 第 11 d 时其累积释放碳氮比为 175.8, 且在第 11 d 时还有明显上升趋势. 为尽可能减少引入外加碳源使系统反硝化负荷增加, 为此选择普通玉米芯或者稀碱加热预处理的玉米芯作为外加碳源更适合.

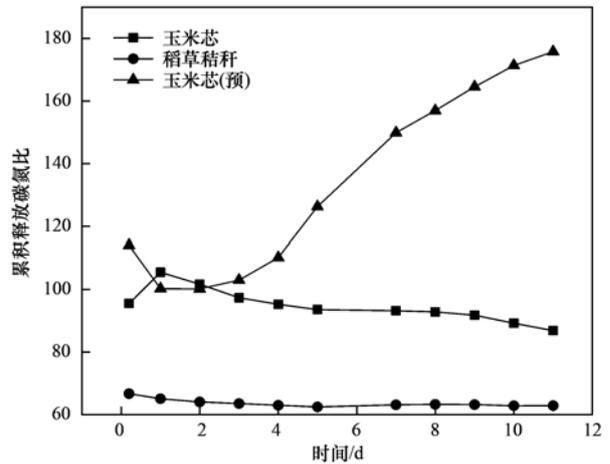


图4 普通玉米芯、稻草秸秆和预处理后玉米芯浸提液中累积释放碳氮比

Fig. 4 Cumulative release of carbon/nitrogen ratio from the extract of common corncob, rice straw, and pretreated corncob

2.2 人工湿地出水的水质变化

2.2.1 COD

各湿地出水 COD 的变化情况如图 5 所示. 从中可知, 除了 8~12 d, 9 组人工湿地装置出水 COD 质量浓度均低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 在运行 24 d 后, 系统出水 COD 基本稳定在较低质量浓度. 此时, 9 组人工湿地装置出水 COD 质量浓度均低于

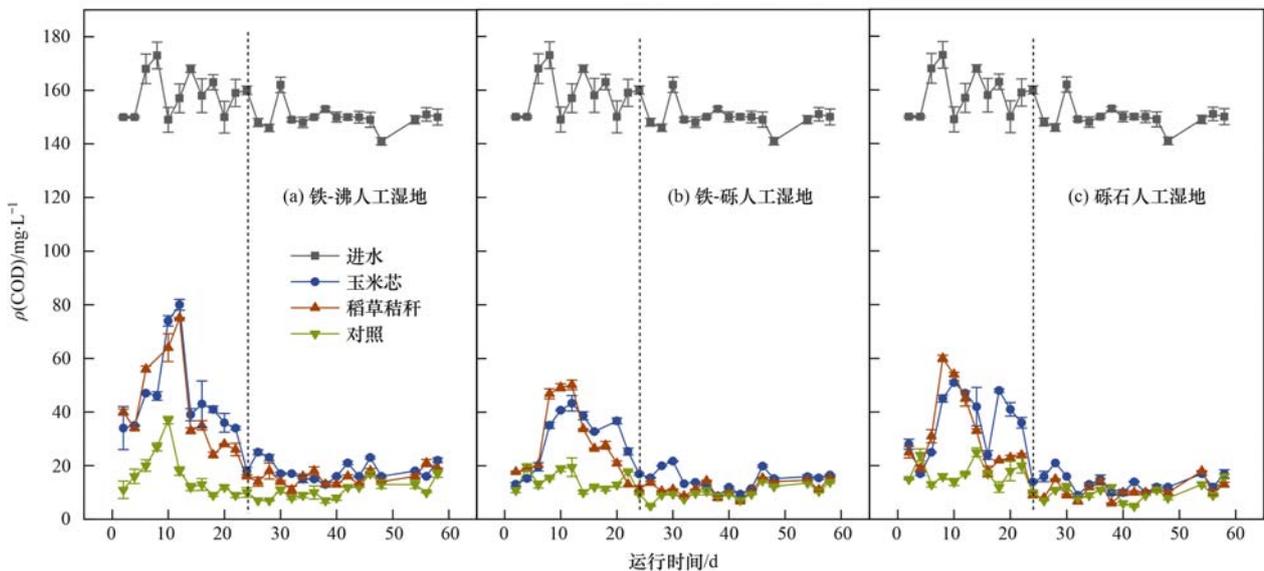


图5 不同处理人工湿地出水 COD 变化情况

Fig. 5 Variation in COD concentration in the effluent of constructed wetlands with different treatments

《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III类水浓度限值($20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),有机物的去除率介于 87.9%~93.4%之间.在 3 组人工湿地中,对照组人工湿地(即不加碳源)的出水 COD 均显著低于玉米芯人工湿地和稻草秸秆人工湿地($P < 0.05$),玉米芯人工湿地出水 COD 略高于稻草秸秆组;而在第 24~58 d 的运行时间中,两者差异显著($P < 0.05$),说明两种碳源在人工湿地中的释碳量和释碳持续时间确有差距.整个运行过程中,玉米芯组、稻草秸秆组和对照组人工湿地 COD 平均去除率分别为 84.20%、

86.21% 和 91.75%.

2.2.2 NO_3^- -N

图 6 为 9 种处理人工湿地运行期间出水 NO_3^- -N 质量浓度的变化.根据出水 NO_3^- -N 质量浓度变化情况,整个运行状况可以大体分为两个时期:0~22 d 和 24~58 d.在第一个时期中,除了对照组偶有波动外,玉米芯组和稻草组出水的 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 基本上都在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,去除率都大于 99%;而对照组中 NO_3^- -N 去除率为 96.46%~97.12%,平均去除率略低于其它两组,但是差异不显著.

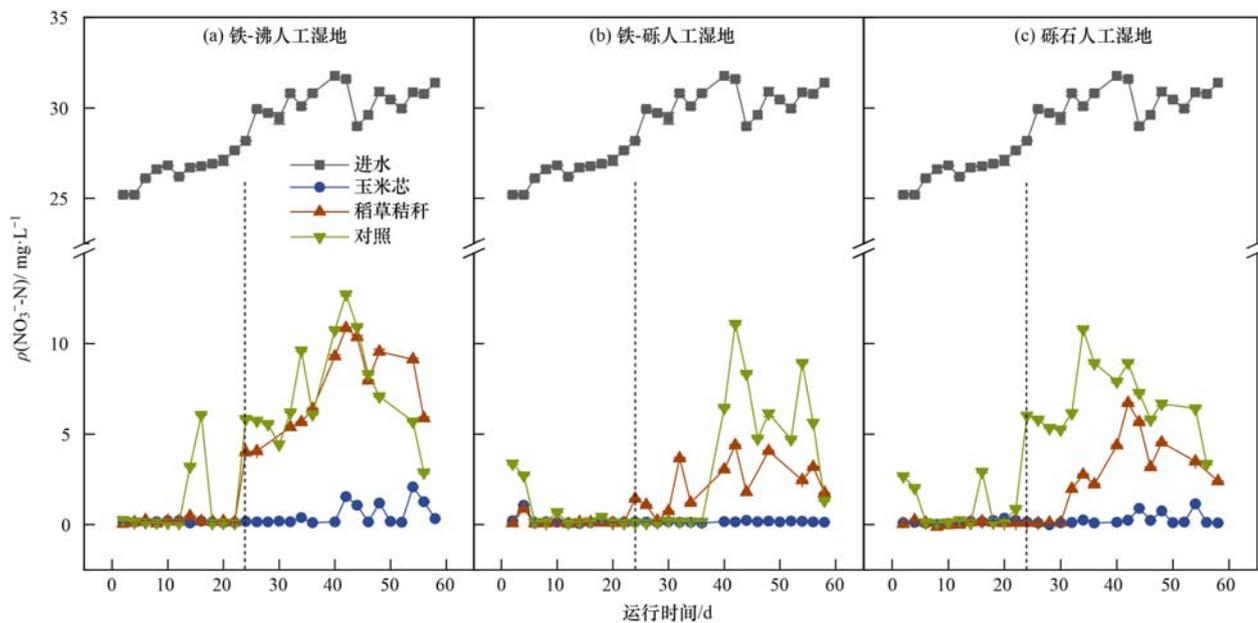


图 6 不同处理人工湿地出水 NO_3^- -N 变化情况

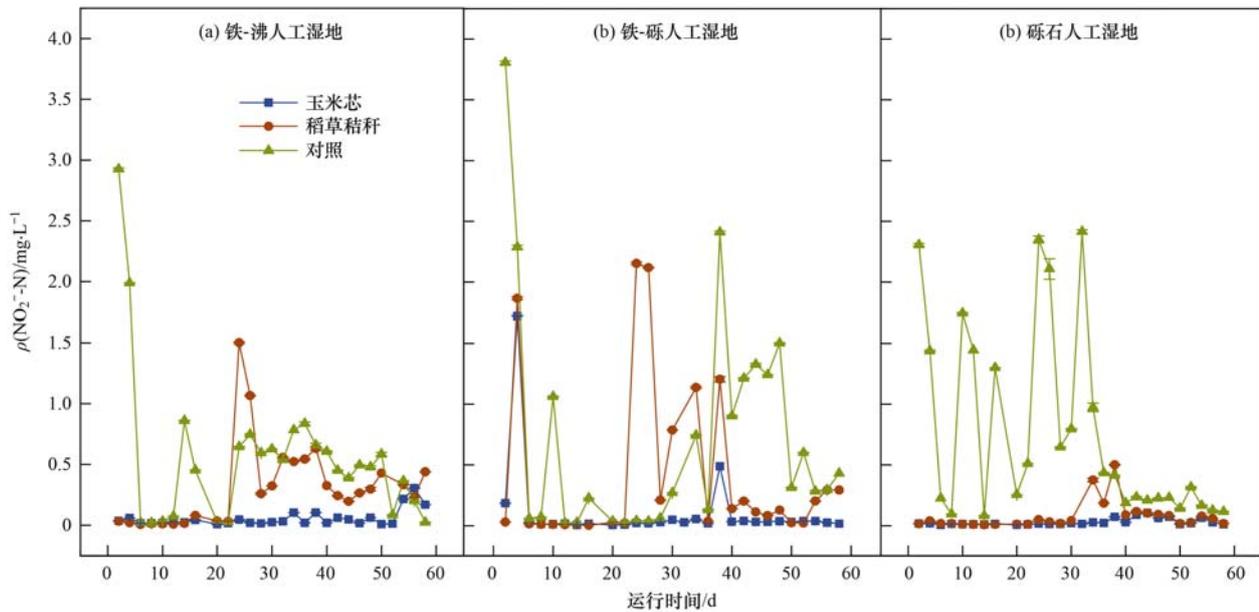
Fig. 6 Variation in NO_3^- -N concentration in the effluent of constructed wetlands with different treatments

在第二个时期,3 组碳源出水中 NO_3^- -N 质量浓度的差异拉大.在铁-沸人工湿地中,添加了玉米芯的湿地出水平均 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 为 $(0.55 \pm 0.62) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而添加稻草秸秆的湿地和对照湿地出水 $\rho(\text{NO}_3^-$ -N) 平均值分别为 $(7.07 \pm 2.58) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(7.27 \pm 2.79) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其对应的平均去除率分别为 98.20%、76.80% 和 76.00%.因此添加玉米芯可以明显降低出水中 NO_3^- -N 质量浓度($P < 0.01$),即玉米芯可以显著强化人工湿地对 NO_3^- -N 的去除,而稻草秸秆的强化作用则不明显.在铁-砾人工湿地中,3 组碳源对 NO_3^- -N 的去除能力大小和在铁-沸人工湿地中保持一致:玉米芯(99.50%) > 稻草秸秆(92.73%) > 对照(88.08%),添加了玉米芯人工湿地出水的 NO_3^- -N 质量浓度与其它两组有明显差异($P < 0.01$).同样,砾石人工湿地各碳源组出水中 NO_3^- -N 质量浓度差异也较大($P < 0.01$),与添加玉米芯 [$(0.27 \pm 0.33) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 相比,添加稻草秸秆 [$(2.69 \pm 2.15) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 和对照组 [(6.76 ± 1.88)

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 出水的 NO_3^- -N 质量浓度较高.

2.2.3 NO_2^- -N

由图 7 可知,相比于玉米芯人工湿地,稻草秸秆和对照组人工湿地中明显有 NO_2^- -N 的蓄积,且在稻草秸秆和对照组中 NO_2^- -N 质量浓度波动较大.在铁-沸人工湿地中,添加玉米芯、稻草秸秆和对照组人工湿地的出水 $\rho(\text{NO}_2^-$ -N) 平均值分别为 (0.055 ± 0.069) 、 (0.312 ± 0.347) 和 $(0.555 \pm 0.618) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;在铁-砾人工湿地,其对应 $\rho(\text{NO}_2^-$ -N) 分别为 (0.108 ± 0.329) 、 (0.413 ± 0.672) 和 $(0.719 \pm 0.921) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.以上说明,相较于往人工湿地中添加稻草秸秆,添加玉米芯可以使其 NO_2^- -N 质量浓度得到显著地降低($P < 0.05$),改善人工湿地中 NO_2^- -N 的蓄积现象.而在砾石人工湿地中,出水 $\rho(\text{NO}_2^-$ -N) 对照组 [$(0.768 \pm 0.786) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 显著高于玉米芯组 [$(0.029 \pm 0.027) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 和稻草秸秆组 [$(0.076 \pm 0.114) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] ($P < 0.05$),玉米芯和稻草秸秆对人工湿地中 NO_2^- -N 的蓄积现象均有明

图7 不同处理人工湿地出水 NO_2^- -N变化情况Fig. 7 Variation in NO_2^- -N concentration in the effluent of constructed wetlands with different treatments

显改善.

2.2.4 TN

不同处理人工湿地出水的 TN 质量浓度随时间的变化情况如图 8 所示. 从中可知, 添加了玉米芯和稻草秸秆的人工湿地出水 TN 均达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中一级 A 标 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 在整个运行过程中, 就 TN 的平均

去除率而言, 无论是铁-沸、铁-砾还是砾石人工湿地, 玉米芯组 (79.22% ~ 87.38%) 都显著高于稻草组 (73.44% ~ 76.61%) 和对照组 (67.61% ~ 71.59%) ($P < 0.01$). 与对照组相比, 添加玉米芯和稻草秸秆对 TN 的去除平均提高了 14.01% 和 5.78%, 且两种碳源对人工湿地系统去除 TN 的强化能力存在显著性差异 ($P < 0.01$).

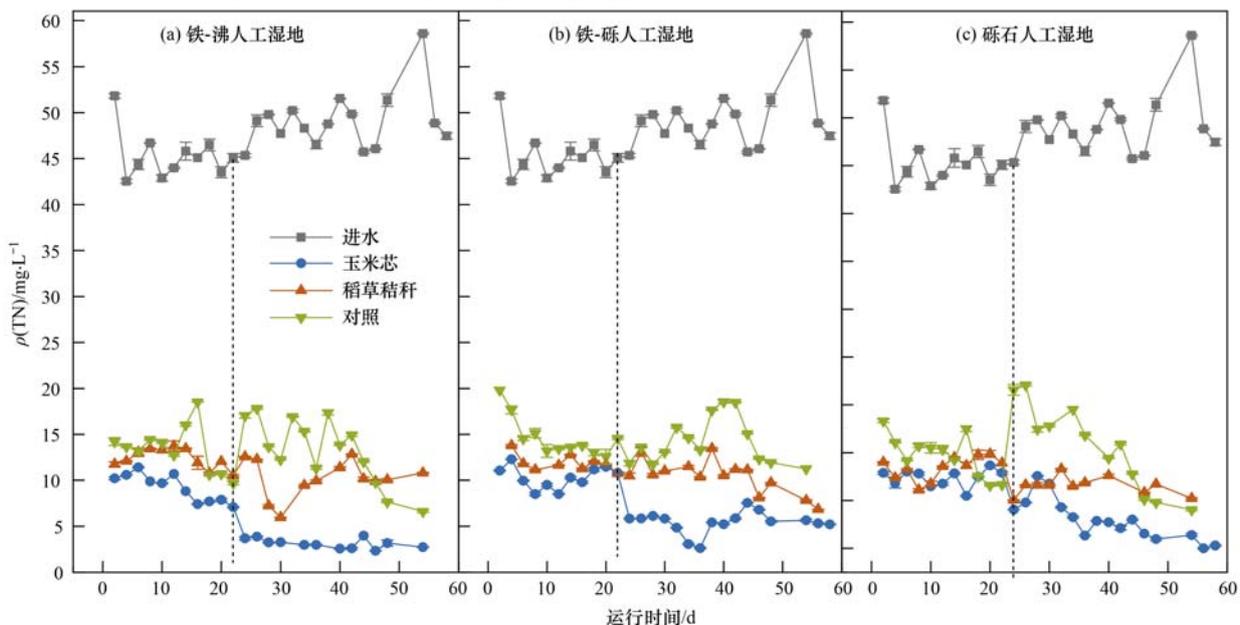


图8 不同处理人工湿地出水 TN 变化情况

Fig. 8 Variation in TN concentration in the effluent of constructed wetlands with different treatments

3 讨论

3.1 玉米芯和稻草秸秆的碳、氮累积释放特征

就释碳总量而言, 3 种碳源中稻草秸秆最高

[$(145.17 \pm 9.44) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$]. 但是植物组织中的氮元素在浸泡过程中也会释放出来, 优良的外加植物碳源应该同时具备稳定、持久地释放碳素和尽可能少地释放氮素, 减少系统的脱氮负荷. 因此良好的植物

碳源应该具有尽可能高的 C/N 值. 分析碳源累积释放碳氮比, 可以发现玉米芯所释放的碳素和氮素含量差距更大, 所释放的碳在去除自身释放的氮的基础上还能为人工湿地系统中氮的去除提供更多的碳源.

凌宇等^[27]的研究表明, 反硝化菌对稻草秸秆浸提液利用程度低导致反硝化过程不充分, 造成 NO_2^- -N 积累, 使 TN 去除率非常低甚至出现负值. 而玉米芯释放的有机物可利用性较高, 更易被反硝化菌利用. 且李斌等^[28]发现稻草浸提液的富里酸荧光峰较玉米芯浸提液强, 前者释放的难分解大分子有机物更多, 释放的有机碳生物惰性相对较强, 更难被微生物利用. 对比释碳品质, 玉米芯更易于被脱氮微生物分解利用. 另外, 有研究还对玉米芯和稻草秸秆进行了扫描电子显微镜分析^[28-30], 发现玉米芯表面较稻草秸秆更粗糙, 有更多的空隙, 更有利于微生物的附着生长; 在静态反硝化运行后, 在玉米芯表面也附着了比稻草秸秆更多的菌膜和反硝化微生物. 综上所述, 相比于稻草秸秆, 玉米芯更适合作为反硝化碳源和载体.

碳源浸提液中 COD 主要来源于植物碳源表面的可溶性有机物和植物碳源自身纤维素、半纤维素和木质素的分解. 在碳源释放过程中, 玉米芯和稻草秸秆 COD 在前期释放较快, 这正是得益于碳源表面的可溶性有机物的快速释放^[30]. 后期释放极其缓慢, 说明两种碳源自身纤维素、半纤维素和木质素的释放相比于预处理后的玉米芯存在较大阻力. 而在前期, 玉米芯(预)的碳素累积释放量低于玉米芯, 这与熊家晴等^[31]的研究结果一致, 主要有两个原因: ①碱加热预处理使玉米芯损失了表面的可溶性有机物; ②碱处理破坏了木质素与半纤维素之间的酯键和醚键、木质素分子间的酯键和碳碳键, 并削弱了半纤维素与纤维素之间的氢键^[32], 使玉米芯的结构被严重破坏, 导致部分碳素流失. 但是结构被破坏另一方面又增加了玉米芯的可及表面积, 使半纤维素和木质素在后期更易从纤维素的结晶结构中释放出来^[33]. 本实验结果也表明, 稀碱加热预处理提高了玉米芯释碳稳定性、释碳量和持续释碳能力, 预处理后的玉米芯整体释碳性能优于稻草秸秆和普通玉米芯, 更有利于反硝化反应的进行和保持人工湿地出水水质的稳定.

3.2 添加玉米芯和稻草秸秆对潜流人工湿地出水 COD 去除的影响

添加相同碳源的人工湿地出水 COD 变化呈现出相同的规律, 玉米芯组和稻草秸秆组的 COD 变化表现为单峰型, 与浸提释放实验的 COD 释放曲线形

式一致, 而对照组出水 COD 质量浓度一直较稳定地保持在最低水平. 结果表明, 较高的玉米芯和稻草秸秆投加量会增加 COD 处理负荷, 从而降低了 COD 的去除率.

玉米芯和稻草秸秆在加入到人工湿地后的 10~12 d, 出水 COD 质量浓度出现峰值, 而后逐渐下降, 其原因是在加入初期, 碳源表面可溶性小分子有机物的大量释放, 使出水 COD 质量浓度迅速上升, 之后碳源在湿地中吸水溶胀, 内部的可溶性有机物也持续释放, 再加上植物碳源自身纤维素、半纤维素被材料表面附着的微生物缓慢分解, 人工湿地系统中的碳素不断得到补充, 这些碳素促进了湿地中微生物的繁殖和植物生长, 而随着碳源释放有机物总量的逐渐减少和微生物、植物的不断消耗, 系统出水的 COD 质量浓度也逐渐下降. 而第 7 组玉米芯人工湿地在第 18~22 d 时出现了第二个 COD 质量浓度峰值, 达到了 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 可能是玉米芯在微生物的作用下产生了有机碳的二次释放, 也可能是因为玉米芯释放的难降解有机物的二次分解. 在运行初期, 添加了玉米芯和稻草秸秆的人工湿地出水 COD 质量浓度偶有超出《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 一级 A 标准 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 为了保证出水能达标排放, 在实际应用中可采取以下措施: ①在计算碳源投加量时将初始 $\text{COD}_{\text{总}}/\text{TN}_{\text{总}}$ 由 6 降低至 5, 减少碳源一次投加量; ②缩短水力停留时间(HRT)至 24 h, 齐冉等^[34]的研究发现在 12、24、36 和 48 h 这 4 种水力停留时间中, 当 $\text{HRT} = 24 \text{ h}$ 时, COD 和 TN 的去除效果最好; ③在碳源加入湿地后, 采用连续流进水方式, 用净水快速冲洗人工湿地, 使碳源尽早达到缓速释放期^[35].

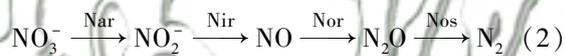
3.3 添加玉米芯和稻草秸秆对潜流人工湿地出水 NO_3^- -N 去除的影响

在运行前期, 添加了植物碳源的人工湿地 NO_3^- -N 去除率都在 99% 以上, 对照组也能达到 96%, 在微生物和植物的双重作用下系统未表现出碳源的缺乏. 一方面, 经过模拟污水对微生物 3 周的驯化, 活性污泥中的优势菌种浓度高、活性强且更能适应系统低碳氮比的水质环境, 反硝化能力强; 另一方面, 活性污泥中还存在大量的死菌, 微生物死后细胞崩解消化也能为人工湿地提供可利用的有机物. 而根系长期浸泡在人工湿地液面以下的部分菖蒲苗未成活缓慢死亡而发生了根系自溶分解作用, 向人工湿地释放了大量碳源^[36]. 但是由于该反应发生在缺氧或厌氧环境中, 因此死亡根系的分解作用缓慢, 便可持续为反硝化过程提供碳源.

系统运行至 24 ~ 58 d 时,各人工湿地出水的 NO_3^- -N 质量浓度均出现波动,但是玉米芯人工湿地的 NO_3^- -N 去除率一直保持在 93% 以上,还是具有良好的反硝化性能,说明玉米芯释放的碳源有效促进了人工湿地中反硝化的进行. 随着内源碳的逐渐消耗,对照组人工湿地出水的 NO_3^- -N 质量浓度大幅上升,去除率下降了 20% 左右; 稻草秸秆人工湿地对于 NO_3^- -N 的去除率降幅在 7% ~ 23% 之间, 2 号稻草秸秆人工湿地出现了明显的碳源不足,反硝化菌的生长受到抑制,降低了系统中的反硝化速率. 这是一个缓慢进行的过程,通过中试可以确定在人工湿地中投加一次碳源的运行周期,一次运行周期结束时即可拉住绳子通过碳源添加管取出植物碳源包,及时投加新碳源,使湿地恢复高效的脱氮作用,并减少碳源残渣对出水水质的影响和可能导致的湿地堵塞等问题. 为避免碳源残渣对环境产生二次污染,可统一收集并集中进行堆肥处理,做到无害化和资源化利用.

3.4 添加玉米芯和稻草秸秆对潜流人工湿地出水 NO_2^- -N 质量浓度的影响

一般认为,异养反硝化过程按照反应式(2)中的 4 个步骤进行^[37].



亚硝酸盐是异养反硝化过程中的中间产物之一,它的累积标志着反硝化进行的不完全^[38]. 有研究表明,碳源、pH、温度、含氧量等因素均会影响亚硝酸盐的累积^[39-41]. 联合本实验中各个人工湿地出水中的 COD 质量浓度可以发现,有机碳的缺乏可能是本实验 NO_2^- -N 蓄积的主要因素. 反应式(2)中的硝酸盐还原酶(Nar)和亚硝酸盐还原酶(Nir)对电子的竞争能力不同,前者竞争能力强于后者. 因此当系统中的碳源有限,即电子供应能力有限时,电子会优先供给硝酸盐还原酶,进行硝酸盐的还原,亚硝酸盐还原酶的活性便受到抑制,导致系统中 NO_2^- -N 产生量增多而消耗量减少,最终出现 NO_2^- -N 的短暂累积. 因此,在实验后期可以观察到,各人工湿地出水中 NO_2^- -N 质量浓度都随着 NO_3^- -N 质量浓度的升高而同步升高. 本实验对照组人工湿地出水 NO_2^- -N 的质量浓度在前 4 d 都较高,而添加了碳源的人工湿地出水中 NO_2^- -N 质量浓度则很低. 分析认为,对照组由于缺乏反硝化需要的关键碳源,无法彻底还原 NO_2^- -N,因此蓄积了较多的 NO_2^- -N,而在添加了植物碳源的人工湿地中,碳源没有成为 NO_2^- -N 还原的限制因素,而且驯化后活性污泥的加入给系统补充了足够的反硝化菌和亚硝酸盐还原酶,进一步促进了

NO_2^- -N 的还原,有效改善了 NO_2^- -N 的蓄积状况.

除了植物碳源,在图 7 中还可以观察到铁碳填料对人工湿地中 NO_2^- -N 质量浓度的重要影响. Fe^0 与活性炭形成的原电池系统中发生了铁碳微电解反应,将 H^+ 还原成 $[\text{H}]$,和 Fe^{2+} 一起作为电子供体促进了自养反硝化反应的进行,加速 NO_3^- 和 NO_2^- 转化为 N_2 ,减少 NO_3^- 和 NO_2^- 还原对有机碳源的依赖^[42]; 另一方面,铁碳填料还能直接为异养反硝化反应提供有机碳源,促进异养反硝化反应的完全进行^[43].

3.5 添加玉米芯和稻草秸秆对潜流人工湿地出水 TN 去除的影响

在整个运行过程中,玉米芯人工湿地出水中的 TN 都主要以 NH_4^+ -N 的形式存在; 在运行前期,稻草秸秆和对照组出水中的 NH_4^+ -N 是其 TN 的主要组分,但是 NH_4^+ -N 的占比随着运行时间的延长而不断下降,反之 NO_3^- -N/TN 值不断上升. 所以, TN 中主要成分的变化也可以反映湿地中硝化反硝化反应进行的速率与完成度. 陈庆昌等^[44]通过研究发现,湿地中 C/N 越高,对 NH_4^+ -N 的去除率越低. 在前期,碳源充足,系统 C/N 较高,湿地中的硝化作用进行不彻底,而 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 残留浓度低,硝化作用成为湿地脱氮的主要限制步骤; 而随着碳源释碳能力的下降与释碳量的减少,硝化速率不断加快, NH_4^+ -N 质量浓度降低, NO_3^- -N 的生成量增多而降解量减少,导致稻草秸秆组和对照组中 NO_3^- -N 质量浓度迅速上升,进而引起 NO_2^- -N 的累积,反硝化作用成为制约脱氮的关键过程,导致两组人工湿地出水 TN 质量浓度并没有明显变化. 玉米芯释放的有机碳虽然有一定程度的减少,但是最终还是充分支持了系统中 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 的还原,保证反硝化的彻底进行, TN 质量浓度有较大幅度的降低. 进一步验证了玉米芯作为外加碳源对潜流人工湿地处理低 C/N 比污水的脱氮性能的强化作用.

4 结论

(1) 在碳源纯水浸提释放实验中,玉米芯浸提液中累积释放碳氮比平均值是稻草秸秆的 1.49 倍. 综合植物碳源的释放特性,玉米芯比稻草秸秆更适合作为外加碳源. 稀碱加热预处理使玉米芯的累积释放碳氮比提高了 41%,进一步提高了植物碳源释碳稳定性、释碳量和持续释碳能力.

(2) 较高的玉米芯和稻草秸秆投加量会增加 COD 处理负荷,从而降低了 COD 的去除率. 除了湿地运行前期偶有 4 ~ 6 d,各人工湿地出水 COD 质量

浓度均低于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 可以达到标排放。

(3) 人工湿地中试后期, 稻草秸秆人工湿地的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度逐渐升高, 去除率下降了 7% ~ 23%, 出现了碳源不足的现象, 系统的反硝化速率下降。 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 也随着 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度的升高而不断蓄积。 而玉米芯人工湿地的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率一直大于 93%, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度也一直保持在很低的水平, 系统具有良好的反硝化性能, 玉米芯释放的碳源有效促进了人工湿地中反硝化的彻底进行。

(4) 通过对 TN 的主要成分分析, 发现在整个运行阶段, 玉米芯人工湿地硝化反硝化的限速步骤始终是硝化反应; 而稻草秸秆和对照组人工湿地在运行后期, 有机碳的缺乏使反硝化反应严重限制了硝化反硝化过程的进行。 添加玉米芯显著强化了潜流人工湿地对低 C/N 比污水的脱氮性能。

参考文献:

- [1] Parde D, Patwa A, Shukla A, *et al.* A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater [J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, **21**, doi: 10.1016/j.eti.2020.101261.
- [2] 张玲, 崔理华. 人工湿地脱氮现状与研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2012, **28**(5): 268-272.
Zhang L, Cui L H. The denitrification status and its research progress of construction wetland [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, **28**(5): 268-272.
- [3] Peng L, Hua Y M, Cai J B, *et al.* Effects of plants and temperature on nitrogen removal and microbiology in a pilot-scale integrated vertical-flow wetland treating primary domestic wastewater [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **64**: 285-290.
- [4] Ji M D, Hu Z, Hou C L, *et al.* New insights for enhancing the performance of constructed wetlands at low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **301**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122722.
- [5] Zhuang L L, Yang T, Zhang J, *et al.* The configuration, purification effect and mechanism of intensified constructed wetland for wastewater treatment from the aspect of nitrogen removal: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **293**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122086.
- [6] Spieles D J, Mitsch W J. The effects of season and hydrologic and chemical loading on nitrate retention in constructed wetlands: a comparison of low- and high-nutrient riverine systems [J]. *Ecological Engineering*, 1999, **14**(1-2): 77-91.
- [7] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **380**(1-3): 48-65.
- [8] Martínez-Espinosa C, Sauvage S, Al Bitar A, *et al.* Denitrification in wetlands: a review towards a quantification at global scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142398.
- [9] Zhong F, Huang S, Wu J, *et al.* The use of microalgal biomass as a carbon source for nitrate removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2019, **127**: 263-267.
- [10] Chu G Y, Yu D H, Wang X X, *et al.* Comparison of nitrite accumulation performance and microbial community structure in endogenous partial denitrification process with acetate and glucose served as carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2021, **320**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124405.
- [11] Badia A, Kim M, Dagnew M. Nitrite denitrification using biomass acclimatized with methanol as complementary carbon source: long-term performance and kinetics study [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2021, **7**(1): 93-106.
- [12] Chen X C, He S B, Zhang Y P, *et al.* Enhancement of nitrate removal at the sediment-water interface by carbon addition plus vertical mixing [J]. *Chemosphere*, 2015, **136**: 305-310.
- [13] Li H, Chi Z F, Yan B X, *et al.* An innovative wood-chip-framework substrate used as slow-release carbon source to treat high-strength nitrogen wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **51**: 275-283.
- [14] 丁怡, 唐海燕, 俞祺, 等. 利用植物碳源提高人工湿地脱氮效果的研究进展 [J]. *工业水处理*, 2020, **40**(3): 7-10.
Ding Y, Tang H Y, Yu Q, *et al.* Research progress in utilizing plant carbon for promoting nitrogen removal effect in constructed wetland [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, **40**(3): 7-10.
- [15] 唐义, 马崑文, 万金泉, 等. 外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3392-3399.
Tang Y, Ma Y W, Wan J Q, *et al.* Two-stage denitrification process performance with solid slow-release carbon source [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3392-3399.
- [16] 邵留, 徐祖信, 王晟, 等. 新型反硝化固体碳源释碳性能研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2323-2327.
Shao L, Xu Z X, Wang S, *et al.* Performance of new solid carbon source materials for denitrification [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(8): 2323-2327.
- [17] Jia L X, Wang R G, Feng L K, *et al.* Intensified nitrogen removal in intermittently-aerated vertical flow constructed wetlands with agricultural biomass; effect of influent C/N ratios [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **345**: 22-30.
- [18] Li M, Sun L L, Song X F. Adding maize cobs to vertical subsurface flow constructed wetlands treating marine recirculating aquaculture system effluents: carbon releasing kinetics and intensified nitrogen removal [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **274**: 267-271.
- [19] 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 等. 铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3482-3493.
Zhao Z J, Hao Q J, Tu T T, *et al.* Effect of ferric-carbon micro-electrolysis on greenhouse gas emissions from constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3482-3493.
- [20] 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 等. 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2875-2884.
Zhao Z J, Hao Q J, Zhang Y Y, *et al.* Wastewater treatment effects of ferric-carbon micro-electrolysis and zeolite in constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2875-2884.
- [21] 晋凯迪. 植物碳源调控下水平潜流湿地强化脱氮试验研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [22] Zhou X, Gao L, Zhang H, *et al.* Determination of the optimal

- aeration for nitrogen removal in biochar-amended aerated vertical flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **261**: 461-464.
- [23] HJ 828-2017, 水质 化学需氧量的测定 重铬酸盐法[S].
- [24] HJ 636-2012, 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [25] HJ/T 346-2007, 水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法[S].
- [26] GB 7493-1987, 水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法[S].
- [27] 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 等. 6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2422-2431.
- Ling Y, Yan G K, Wang H Y, *et al.* Release mechanisms of carbon source and dissolved organic matter of six agricultural wastes in the initial stage[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2422-2431.
- [28] 李斌, 郝瑞霞. 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1428-1434.
- Li B, Hao R X. Comparison and optimization of cellulose carbon source for denitrification filter [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1428-1434.
- [29] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 农业废物反硝化固体碳源的优选[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(5): 748-754.
- Shao L, Xu Z X, Jin W, *et al.* Optimization of solid carbon source for denitrification of agriculture wastes [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(5): 748-754.
- [30] 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 等. 预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 987-994.
- Zhao W L, Hao R X, Li B, *et al.* Effects of pretreatment methods on corncob as carbon source for denitrification [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 987-994.
- [31] 熊家晴, 孙建民, 郑于聪, 等. 植物固体碳源添加对人工湿地脱氮效果的影响[J]. *工业水处理*, 2018, **38**(9): 41-44.
- Xiong J Q, Sun J M, Zheng Y C, *et al.* Influences of solid plant carbon source addition on the denitrification effect in constructed wetland[J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, **38**(9): 41-44.
- [32] Zheng Y C, Cao T, Zhang Y D, *et al.* Characterization of dissolved organic matter and carbon release from wetland plants for enhanced nitrogen removal in constructed wetlands for low C-N wastewater treatment[J]. *Chemosphere*, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129630.
- [33] Shafiei M, Kumar R, Karimi K. Pretreatment of lignocellulosic biomass [A]. In: Karimi K (Ed.). *Lignocellulose-Based Bioproducts* [CC]. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 85-154.
- [34] 齐冉, 张灵, 杨帆, 等. 水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4296-4303.
- Qi R, Zhang L, Yang F, *et al.* Effect of hydraulic residence time on removal efficiency of pollutants in subsurface flow constructed wetlands and analysis of denitrification mechanism [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4296-4303.
- [35] 苑天晓. 外加碳源人工湿地处理污水厂尾水的脱氮工艺研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. 27-29.
- Yuan T X. Effect of external carbon sources on nitrogen removal in constructed wetlands treating tail water from wastewater treatment plant[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. 27-29.
- [36] 赵德华, 吕丽萍, 刘哲, 等. 湿地植物供碳功能与优化[J]. *生态学报*, 2018, **38**(16): 5961-5969.
- Zhao D H, Lü L P, Liu Z, *et al.* The carbon source function of constructed wetland macrophytes and its improvement strategy [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(16): 5961-5969.
- [37] Huang L, Gao X, Guo J S, *et al.* A review on the mechanism and affecting factors of nitrous oxide emission in constructed wetlands [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(8): 2171-2180.
- [38] Vidal-Gavilan G, Carrey R, Solanas A, *et al.* Feeding strategies for groundwater enhanced biodenitrification in an alluvial aquifer: chemical, microbial and isotope assessment of a 1D flow-through experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **494-495**: 241-251.
- [39] Gómez M A, Hontoria E, González-López J. Effect of dissolved oxygen concentration on nitrate removal from groundwater using a denitrifying submerged filter[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, **90**(3): 267-278.
- [40] 周梦娟, 缪恒锋, 陆震明, 等. 碳源对反硝化细菌的反硝化速率和群落结构的影响[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(12): 2047-2054.
- Zhou M J, Miao H F, Lu Z M, *et al.* The influence of different carbon sources on denitrification rate and community structure of denitrifying bacteria [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(12): 2047-2054.
- [41] 李思倩, 路立, 王芬, 等. 低温反硝化过程中 pH 对亚硝酸盐积累的影响[J]. *环境化学*, 2016, **35**(8): 1657-1662.
- Li S Q, Lu L, Wang F, *et al.* Effect of pH on nitrite accumulation during denitrification at low temperature [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(8): 1657-1662.
- [42] Deng S H, Li D S, Yang X, *et al.* Biological denitrification process based on the Fe(0)-carbon micro-electrolysis for simultaneous ammonia and nitrate removal from low organic carbon water under a microaerobic condition [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **219**: 677-686.
- [43] Shen Y H, Zhuang L L, Zhang J, *et al.* A study of ferric-carbon micro-electrolysis process to enhance nitrogen and phosphorus removal efficiency in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **359**: 706-712.
- [44] 陈庆昌, 冯爱坤, 罗建中. 人工湿地脱氮技术研究[J]. *工业安全与环保*, 2008, **34**(7): 17-19.
- Chen Q C, Feng A K, Luo J Z. Study on the denitrifying techniques for constructed wetlands [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2008, **34**(7): 17-19.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water; A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)